DOI:10.11931/guihaia.gxzw201910005

不同磷水平对柱花草形态学指标的影响

刘金凤，陈达飞，段新慧，周凯，赵小雪，罗富成，文亦芾*
（云南农业大学 动物科学技术学院，昆明 650201）

摘要：在不同磷素水平培养条件下，探讨磷胁迫对柱花草形态指标及生物量的影响，评价柱花草对磷浓度的耐受性。以 12 个不同基因型柱花草品种为材料，设置 7 个磷肥梯度， 分别为 0.2、0.1、0.075、0.050、0.035、0.02 g • Kg^{-1}，以不施磷肥为对照，采用盆栽方法进行施肥试验，比较不同柱花草品种形态指标对不同磷浓度的响应及生物量状况，旨在筛选出磷高效的柱花草品种。结果表明：随着土壤磷浓度的逐渐增大，各品种柱花草均呈现分枝数、株高和茎粗均逐渐增大；根长逐渐减小；地上部分和地下部分生物量升高的趋势。在低磷和高磷处理下西卡、库克柱花草的地上生物量均小于每株 9.64 g（以供试材料中最高生物量的约 2/3 为临界线），为磷低效型柱花草；有钩、GC1463 柱花草的地上生物量均高于每株 9.64 g，为磷高效型柱花草；澳克雷、CIAT11365、格拉姆、爱德华（90080-2）、热研 5 号、Capitata、GC1480、GC1576 柱花草的地上生物量在低磷处理下小于每株 9.64 g，在高磷处理下高于每株 9.64 g，为磷敏感型柱花草。土壤磷含量对柱花草的形态指标影响较大，磷高效型柱花草对低磷土壤环境适应性较强。

关键词：柱花草，供磷水平，形态特征，磷效率，生物量
中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A

Effects of different phosphorus concentrations on morphological indexes of *Stylosanthes guianensis*

LIU Jinfeng, CHEN Dafei, DUAN Xinhui, ZHOU Kai, ZHAO Xiaoxue, LUO Fucheng, WEN Yifu*
(*College of Animal Science and Technology*, *Yunnan Agricultural University*， Kunming 650201, China)

Abstract: Under the condition of different phosphorus levels, the effects of phosphorus stress on the morphological indexes and biomass of *Stylosanthes guianensis* were studied, and the tolerance of *Stylosanthes* to phosphorus concentration was evaluated. Using 12 different genotypes of *Stylosanthes guianensis* as the material, 7 phosphate fertilizer gradients were set up, 0.2, 0.1, 0.075, 0.050, 0.035, 0.02 g • Kg^{-1}, respectively, with no phosphate fertilizer as a control, and the fertilization experiment was carried out by potting method. The response of different morphological indexes of different *Stylosanthes guianensis* species to different phosphorus concentrations and biomass status were compared. Designed to screen out phosphorus-efficient species of *Stylosanthes guianensis*. The results showed that with the increase of soil phosphorus concentration, the number of branches, plant height and stem diameter increased gradually; root length decreased gradually; the dry mass of aboveground and underground parts increased. Under the treatment of low phosphorus and high phosphorus, the aboveground dry mass of *S. scabra* 'Seca', *S. guianensis* 'COOK' was less than 9.64 g • $plant^{-1}$（taking about 2/3 of the highest biomass in the test materials as the critical line）, which was phosphorus inefficient *Stylosanthes* species; the aboveground dry mass of *S. hamataev.verano*, *S. guianensis* 'GC1463' was higher than 9.64 g • $plant^{-1}$. The plant is a phosphorus-efficient *Stylosanthes* species; the aboveground dry mass of *S. guianensis* 'Oxley', *S. guianensis* TRPC90072, *S. guianensis* 'Graham', *S. guianensis* 'Endeavour', *S. guianensis* 'Reyan No.5', *S.capitata*, *S. guianensis* 'GC1480', *S. guianensis* 'GC1576' is less than 9.64 g • $plant^{-1}$t under low phosphorus treatment. The species was higher than 9.64 g • $plant^{-1}$ under high phosphorus treatment and was a phosphorus-sensitive *Stylosanthes guianensis* species. The soil phosphorus content had a great influence on the morphological indexes of *Stylosanthes guianensis*, and the phosphorus-efficient *Stylosanthes guianensis* had strong adaptability to the low-phosphorus soil

基金项目：国家自然科学基金（31160481，31560665）[Supported by the National Natural Science Foundation of China（31160481，31560665）]。
作者简介：刘金凤（1995-），女，云南昆明人，硕士研究生，研究方向为草种质资源与育种研究，（E-mail）2805744130@qq.com。
***通信作者：**文亦芾，博士，教授，研究方向为草种质资源与育种研究，（E-mail）1301814839@qq.com。

environment.
Key words: *Stylosanthes guianensis*, phosphorus supply, morphological characteristics, phosphorus efficiency, biomass

磷是植物生长发育过程中必需的元素，以多种途径参与体内各种代谢过程，对植物生长发育具有重要作用（Hou et al., 2017）。土壤中总磷含量较高，但多以难溶态磷如铝-磷、铁-磷和钙-磷等形式存在（Schachtman & Ayling，1998）。全世界耕地中约有 50%的耕地处于缺磷状态，而我国耕地中大约有 2/3 的耕地处于缺磷状态（李继云等，1995）。植物磷素吸收和利用效率存在的显著差异能在植物的外部形态和内部生理生化过程中表现出来，即在磷素亏缺的胁迫选，植物可通过形态学和生理学过程的改变来提高植物对低磷胁迫的适应能力。植物对磷的摄取能力是植物磷高效基因型的基本特征，其磷摄取的高效机制主要涉及根形态、根分泌、膜转运、体内转运以及菌根等性状的适应性变化。这些高效机制有的是结构性的，有的则是诱导性的，但这两类机制都要受遗传控制（Chakraborty，et al., 2004；赖志强等，2010；蔡小艳等，2010；何华玄等，2000）。如低磷胁迫能诱导白羽扇豆形成簇生根，显著提高磷吸收效率（涂旭川等，2008），耐低磷水稻的侧根长、侧根数量及侧根密度均明显增加（张富林等，2009）。磷高效植物还可通过增加有机酸的分泌，促进植物对难溶性磷的活化与吸收。

柱花草（*Stylosanthes guianensis*）是一种优良的豆科牧草，该品种茎叶产量高，营养丰富，适应性强，从砂质土到重粘土均可良好生长，耐干旱，耐酸性瘦土，是热带、亚热带地区最重要的放牧和刈割兼用型豆科牧草，主要用于人工草地建设、天然草地改良、林果草生态工程建设，在我国柱花草已在广东、海南、广西、云南、贵州、福建、四川等省区推广种植（李雪枫等，2017；周碧燕和郭振飞，2005；单国燕等，2009；白昌军等，2004；邵辰光等，2013；蒋昌顺，1995）。在全球土壤退化、磷素缺乏、牧草缺乏的环境下，研究柱花草对磷元素胁迫的响应对实现农牧业可持续发展意义重大。大多数柱花草基因型对低磷环境都有比较好的适应性，可以在低磷的酸性红壤区生长，并具有较高产草量，但是磷高效基因型柱花草比磷敏感型品种地上生物量高2～4倍，表现出既耐低磷又具有高产潜力的优良基因型性状（蒋昌顺和张新申，2006）。纵观目前柱花草的研究现状，有关磷效率基因型柱花草的形态解剖方面的研究尚不多见，本试验剖析不同磷浓度对不同基因型柱花草形态学发生的影响，研究磷素对柱花草生长的影响，划分供试材料的磷效率类型，为柱花草选种及深层研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用云南省农业科学院热区生态农业研究所的 12 个柱花草品种作为供试材料，各供试材料采用简易编号，即 1～12 号分别编号不同品种，西卡柱花草(*S. scabra* ‘Seca’, S01)，澳克雷(*S. guianensis* ‘Oxley’，S02)，CIAT11365 柱花草(*S. guianensis* TRPC90072，S03)，格拉姆柱花草（*S. guianensis* ‘Graham’，S04)，爱德华(90080-2)（*S. guianensis* ‘Endeavour’，S05)，热研 5 号柱花草（*S. guianensis* ‘Reyan No.5’，S06)，库克柱花草(*S. guianensis* ‘COOK’，S07)，Capitata(*S. guianensis* ‘COOK’， S08)，有钩柱花草（*S. hamataev.verano*，S09)，GC1463（*S. guianensis* ‘GC1463’，S10)，GC1480（*S. guianensis* ‘GC1480’， S11)，GC1576（*S. guianensis* ‘GC1576’，S12）

1.2 试验区情况

试验区位于云南省农业科学院热区生态农业研究所羊开窝基地退化生态系统综合治理技术研究试验示范区(101°49′35.3″E，25°50′67.7″N) 进行，海拔 1 071 m。该区夏季高温多雨，冬季低温干旱，土壤为沙壤土。经测定，土壤肥力状况为：有机质 12.6g • Kg^{-1}，全氮 1.55 g • Kg^{-1}，速效磷 12.26 mg • Kg^{-1}，速效钾 70.50 mg • Kg^{-1}，pH 值 5.65。

1.3 试验方法

1.3.1 试验处理

以 12 个磷效率基因型柱花草品种开展苗期的批量筛选试验。取当地从未进行过耕作管理措施的杂草地土壤为供试土壤，土壤经过自然干燥、捣碎、除杂、过筛等处理，施入氮肥（尿素）和钾肥（氯化钾），其施入量为氮肥 0.2 g • Kg^{-1}、钾肥 0.2 g • Kg^{-1}，充分搅拌、混匀备用。同时取过 2 mm 筛处理的未施肥料的土壤用于土壤理化性状分析。

试验设 7 个磷（P_2O_5）梯度，分别为 0.2、0.1、0.075、0.050、0.035、0.02 g • Kg^{-1} 土和不施磷肥处理，各处理分别用 P200、P100、P75、P50、P35、P20、P0（CK）代表。按试验设计将磷分别施入上述土壤基质中，充分混匀搅拌，分别装在口径 30 cm、高度 35 cm 的花盆中，装土 11.5

Kg。供试材料生长 60 d 后取样观测。

1.3.2 材料播种及田间管理

试验在云南省农业科学院热区生态农业研究所网室进行。催芽 1 d 后, 将已露白的种子接种根瘤菌后，播于育苗板中，待长出 1～2 片真叶时，移栽至盆钵，每盆 6 株。每一品种，按设置的 7 个磷水平各种 5 个重复，常规管理，磷肥为基肥施用。

1.3.3 测定指标及方法

首先测量各品种的株高、茎粗，然后从盆内取出植株，洗净盆土，并测定其主根长和生物量。

（1）株高与茎粗：每个重复随机挑选具有代表性的 3 株植株测量从地面至植株的最高部位的绝对高度，求其平均值。各品种的茎粗采用游标卡尺测定，求其平均值。

（2）主根长：采用方格测量法，将根系仔细的分开，置于坐标纸上，测出主根长度。

（3）单株生物量测定：选取洗净泥土的植株把植株按地上部分、地下部分分开，然后将植株各部分置于 105 ℃烘箱中杀青 10 min，80 ℃烘干 24 h 至恒重，分别称量地上部分和地下部分干重。

（4）磷效率表示方法：植物的磷效率可以低磷条件下植株的生物量为指标（杜育梅等，2008），依据 Lynch（1998）对养分效率和植物施肥的反应程度分类标准，即以供试材料中最高生物量的约 2/3 为临界线，产量在低磷处理和高磷处理下均低于临界值为磷低效型；产量在低磷处理下低于临界值，在高磷处理下高于临界值为磷敏感型；产量在低磷处理和高磷处理下均高于临界值为磷高效型。

1.4 数据统计分析

所有数据均利用 Excel2010 作图、SPSS17.0 进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同磷处理对柱花草生长的影响

2.1.1 不同磷处理对柱花草分枝数的影响

由表 1 可知，不同品种柱花草在同一施磷水平下，最大总分枝数与最小总分枝数之间差异显著，其他总分枝数间有差异但差异不显著，S06 在 P200 处理条件下，总分枝数最大，10.40 条。同一品种柱花草在不同的施磷水平下（除 P20 外）总分枝数与 P0 相比差异显著。S01 在 P50 处理条件下总分枝数达到最大值 9.60 条，与 P75 处理条件下有差异，但差异不显著；S04、S09 在 P75 处理条件下，总分枝数度达到最大值；S02、S07、S08 在 P100 处理条件下，总分枝数达到最大值；S03、S05、S06、S10、S11、S12 在 P200 处理条件下，总分枝数达到最大值。其受施肥量的影响与第一分枝长度的趋势基本一致，说明 S01、S04、S09 对磷肥的需求量较低，在本试验设计梯度中，最适施肥（P_2O_5）量为 0.075 g • Kg^{-1}；S02、S07、S08 最适施肥量为 0.1 g • Kg^{-1}；S03、S05、S06、S10、S11、S12 最适施肥量为 0.2 g • Kg^{-1}。

2.1.2 不同磷处理对柱花草株高的影响

由表2可知，随着土壤中磷含量的增加，12种柱花草株高逐渐增大。品种间比较发现，在相同磷处理水平下，12种柱花草的株高存在差异，在不施磷肥的情况下（P0），品种S02、S04、S07、S08、S09、S10、S11的株高要显著高于S01、S03、S05、S06、S12 ($P<0.05$)。在高磷水平下（P200），S01株高最小，显著低于其它11个品种($P<0.05$)。其中S09和S10两个品种对磷水平的响应不明显，在P0水平下，S09和S10的株高分别为：49.09 cm和50.01 cm，而在P200水平下，两者的株高分别为：54.52 cm和55.12 cm，两者分别增加了9.96%和10.22%。这说明磷水平对S09和S10两个柱花草品种株高的影响不大。

表1 不同磷处理下柱花草总分枝数的变化

Table 1 Variation of the number of the all effective branch of different *Stylosanthes guianensis* under different P levels (piece)

品种 Variety	总分枝数 Number of the all effective branch						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	3.00±0.32cdD	3.20±0.37cdD	5.00±0.71bcdeC	9.60±0.40aA	9.00±0.45abAB	5.60±0.40bcC	8.00±0.45bcB
S02	4.20±0.58bcF	4.80±0.37bcEF	6.20±0.58abcBCD	7.40±0.51bcAB	6.60±0.40cdeAB	8.00±0.71aA	5.60±0.51dCDE
S03	5.00±0.71abC	5.60±0.50abBC	4.20±0.37deC	6.60±0.24cdAB	7.80±0.37bcA	5.20±0.37bcBC	8.00±0.701bcA
S04	5.00±0.32abC	5.60±0.68abC	6.00±0.71abcC	8.40±0.51abAB	9.80±0.58aA	4.60±0.51cC	7.80±0.37bcB
S05	4.40±1.14bcC	4.00±0.71bcC	4.00±0.71eC	5.60±0.51deBC	7.00±0.45cdeAB	6.20±0.37bAB	7.60±0.51bcA
S06	4.60±0.51bD	5.00±0.71bcD	7.00±0.71aC	7.80±0.37bcC	10.00±0.71aAB	8.60±0.51aBC	10.40±0.51aA
S07	6.40±0.51aB	7.00±0.45aAB	6.40±0.51abAB	6.60±0.51cdB	7.40±0.51cdAB	8.20±0.66aA	7.80±0.58bcAB
S08	3.60±0.40bcdC	4.00±0.71bcC	4.40±0.40cdeC	6.80±0.66bcdB	7.00±0.45cdeB	8.60±0.51aA	7.20±0.37cAB
S09	3.60±0.24bcdC	4.00±0.71bcBC	4.60±0.51bcdeABC	4.40±0.40eABC	5.80±0.37deA	5.20±0.37bcAB	5.20±0.37dAB
S10	4.60±0.51bD	5.20±0.58abBCD	5.20±0.37abcBCD	6.20±0.58cdABC	6.40±0.51cdeAB	4.80±0.37bcCD	7.60±0.40bcA
S11	4.60±0.51bC	5.20±0.58abBC	4.60±0.51bcdeC	6.80±0.66bcdB	5.60±0.51eBC	5.80±0.37bcBC	8.60±0.51bcA
S12	2.60±0.40dD	3.00±0.45dD	5.80±0.49abcC	7.40±0.51bcB	6.40±0.51cdeBC	8.80±0.37aA	9.20±0.58abA

注：同列中不同小写字母表示同一磷处理下不同品种之间存在显著差异(P<0.05)，同行中不同大写字母表示同一品种不同磷处理之间存在显著差异(P<0.05)。下同。

Note:The datum with the different small letters show significant differences among different variety of the same P level (P<0.05) in the same column, the different big letters show significant differences among different P level of the same variety(P<0.05) in the same line. The same below.

表2 不同磷处理下柱花草株高的变化

Table 2 Variation of plant height of different *Stylosanthes guianensis* under different P levels (cm)

品种 Variety	株高 Plant height						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	39.13±1.25eD	41.00±1.05eCD	42.60±1.50eBC	44.06±1.40cABC	45.52±1.04cAB	46.78±0.49fA	46.12±0.75eA
S02	45.20±0.46bcE	48.60±0.75bcD	53.80±1.10bC	54.32±1.03aC	58.24±0.99aB	59.04±0.80aB	62.10±0.78aA
S03	40.14±0.67deE	45.84±0.40dD	49.20±0.89dC	53.54±1.07abB	53.54±0.47bB	56.62±0.45bcA	57.96±0.87bA
S04	46.22±0.45bcE	49.70±0.79bD	57.68±0.62aAB	54.24±1.53aC	58.50±1.00aAB	55.96±0.80cdBC	59.84±0.50bA
S05	39.54±0.64deE	42.52±0.74eD	42.30±0.99eDE	50.42±0.65bC	48.16±0.67cC	53.52±1.29dB	58.54±1.42bA
S06	39.06±0.40eE	42.00±1.05eD	43.20±0.80eD	46.36±1.05cC	48.14±0.71cBC	49.14±0.67eAB	50.86±0.81dA
S07	45.36±1.72bcC	48.78±0.90bcC	53.54±0.71bcB	53.94±0.69abAB	55.10±3.45abAB	58.62±1.13abA	57.94±0.55bAB
S08	45.84±2.07bcD	49.30±0.79bcC	49.54±1.13dC	50.88±0.90abBC	52.04±0.57bABC	53.62±0.78dAB	54.70±0.55cA
S09	49.09±1.86abB	52.78±1.04aA	52.96±1.92bcA	53.68±0.64abA	54.18±0.67bA	54.34±0.52cdA	54.52±0.26cA
S10	50.01±1.69aB	53.18±1.44aAB	53.58±1.45bcAB	53.68±1.65abAB	54.04±0.52bA	54.64±0.47cdA	55.12±0.77cA
S11	43.18±0.78cdE	46.62±0.98cdD	50.28±0.60cdC	53.36±1.38abB	55.50±0.70abAB	56.28±0.84bcA	57.60±0.45bA
S12	39.32±1.19eE	42.60±0.86eD	44.18±0.84eCD	46.52±0.62cBC	47.60±0.79cAB	48.42±0.75efAB	49.14±0.63dA

2.1.3 不同磷处理对柱花草茎粗的影响

由表3可知，不同品种柱花草的茎粗对磷水平的响应较一致，随着磷浓度的升高茎粗有增粗的趋势，在P75至P200处理下茎粗之间差异不显著，可能是由于磷素比较充足造成。不同品种的柱花草在同一磷处理下茎粗有差异，在P0和P20的处理条件下，S09要显著高于其他品种。在P20处理条件下，S09相较于茎粗最小的S0、S04，茎粗增加了37.5%；随着磷浓度的增加，各品种间差异逐渐缩小，在P200处理下除S03、S04、S09、S11显著大于S08外(P<0.05)，其他品种间差异未达显著水平，其中茎粗最大的S03和S11较茎粗最小的S08增加了17.4%。由此可见，随着磷浓度的增加，不同基因型柱花草品种的茎粗均有增粗，在磷浓度达到一定水平（磷素相对充足的情况下）之后茎粗基本不再变化。

2.1.4 不同磷处理对柱花草主根长的影响

根是植物吸收水分和营养成分的主要器官，当土壤中的营养成分不一致时，根的形态特征就会发生改变。由表 4 可知，在相同的磷浓度处理下，各柱花草品种间有差异，在不同磷浓度处理条件下，各柱花草的主根长间有差异。在 P0 处理下 S10 主根长最长， 26.84 cm，S01 主根长最短，12.94 cm， 二者间差异显著；在 P200 处理下，以 S10 主根长最长，22.12 cm，S01 主根长最短，10.76 cm 二者间差异显著，P0 处理相比于 P200，S10、S01 的主根长减小了 17.59%、16.85%，差异显著，说明柱花草主根长度随着土壤中磷浓度的增加，各品种柱花草根长减小，低磷促进根系的生长。 比较七个磷浓度处理下的柱花草品种发现，品种 S01、S07、S09、S10 主根长变化幅度较小，各品种的最长根长比最小根长分别增加 32.34%、13.67%、30.10%、23.92%，说明，各不同基因型柱花草品种根长对磷浓度的响应虽一致，但品种 S01、S07、S09、S10 根长对磷的响应较弱。

表3 不同磷处理下柱花草茎粗的变化

Table 3 Variation of stem diameter of different *Stylosanthes guianensis* under different P levels (cm)

品种 Variety	茎粗 Stem diameter						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	0.18±0.00bcdC	0.20±0.01cdeBC	0.21±0.01bB	0.22±0.01bcB	0.22±0.01cdB	0.22±0.01bB	0.26±0.01abA
S02	0.17±0.01cdE	0.18±0.01eDE	0.20±0.01bcCD	0.22±0.01bcBC	0.24±0.01bcAB	0.25±0.01aA	0.25±0.01abcA
S03	0.17±0.00cdD	0.19±0.01deCD	0.20±0.01bcC	0.23±0.01abcB	0.27±0.01aA	0.26±0.01aA	0.27±0.01aA
S04	0.16±0.01dD	0.18±0.01eCD	0.20±0.01bcC	0.23±0.01abcB	0.25±0.01abAB	0.26±0.01aA	0.26±0.01abA
S05	0.19±0.01bcD	0.22±0.00bcC	0.22±0.00abC	0.24±0.01abB	0.25±0.01abAB	0.26±0.01aA	0.25±0.01abcAB
S06	0.18±0.01bcdB	0.20±0.00cdeB	0.20±0.01bcB	0.23±0.01abcA	0.24±0.01bcA	0.24±0.01abA	0.25±0.01abcA
S07	0.18±0.01bcdC	0.20±0.01cdeB	0.21±0.00bB	0.23±0.01abcA	0.23±0.01bcdA	0.24±0.01abA	0.24±0.01bcA
S08	0.17±0.01cdC	0.19±0.01deBC	0.18±0.00cC	0.21±0.01cAB	0.21±0.01dAB	0.22±0.01bA	0.23±0.01cA
S09	0.22±0.01aB	0.25±0.01aA	0.24±0.01aAB	0.24±0.01abAB	0.24±0.01bcAB	0.25±0.01aA	0.26±0.01abA
S10	0.18±0.01bcdC	0.21±0.01bcdB	0.20±0.00bcB	0.24±0.01abA	0.23±0.01bcdA	0.25±0.01aA	0.25±0.01abcA
S11	0.20±0.01abD	0.23±0.00abC	0.24±0.01aBC	0.25±0.01aABC	0.24±0.01bcBC	0.26±0.01aAB	0.27±0.01aA
S12	0.18±0.01bcdC	0.20±0.01cdeBC	0.21±0.01bB	0.23±0.01abcA	0.23±0.01bcdA	0.24±0.01abA	0.25±0.01abcA

表4 不同磷处理下柱花草主根长的变化

Table 4 Variation of root length of different *Stylosanthes guianensis* under different P levels (cm)

品种 Variety	主根长 Root length						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	12.94±0.42eAB	11.76±0.42eBC	12.46±0.54eABC	14.24±0.37gA	13.28±0.82eAB	13.42±0.56fgAB	10.76±0.66gC
S02	20.66±1.32cA	18.78±0.49cB	16.06±0.27dC	17.98±0.35eB	12.36±0.62efD	12.22±0.30gD	14.60±0.51deC
S03	19.42±0.66cdA	17.66±0.38cdB	12.06±0.29eCD	13.62±0.67gC	10.12±0.67fE	10.14±0.46hE	10.74±0.83gDE
S04	23.30±0.47bA	21.18±0.82bB	20.46±0.25bBC	19.48±0.77dBC	18.98±0.93bcC	14.70±0.28fD	12.66±0.49fE
S05	24.02±0.86bA	21.84±0.34bB	21.90±0.45aB	20.28±0.95cdBC	18.56±0.74bcdCD	18.14±0.48cdD	14.94±0.40dE
S06	20.68±0.58cA	18.8±1.03cAB	15.48±0.19dCD	15.92±0.34fCD	17.42±2.08cdBC	14.44±0.28fD	13.32±0.27efD
S07	18.46±0.35dA	16.78±0.37dBC	17.88±0.41cAB	16.52±0.23fC	16.24±0.32dC	16.96±0.57deBC	16.26±0.52cdC
S08	23.72±0.63bA	22.48±0.31bAB	21.94±0.45aB	22.14±0.31abB	20.93±0.43abB	19.34±0.83bcC	16.16±0.37cdD
S09	24.64±0.52bA	22.42±0.25bB	21.42±0.42abB	19.52±0.58dC	19.26±0.68bcC	18.94±0.49bcC	19.04±0.45bC
S10	26.84±0.40aA	24.44±0.33aB	22.66±0.28aCD	23.46±0.34aBC	22.38±0.48aCD	21.66±0.45aD	22.12±0.70aCD
S11	24.64±0.39bA	22.45±0.40bB	18.64±0.42cC	19.84±0.34dC	16.66±0.32cdD	16.32±0.50eD	13.06±0.53efE
S12	23.18±0.27bA	22.38±0.57bAB	21.66±0.93abABC	21.44±0.33bcABC	20.78±0.75abBC	19.86±0.71bC	16.98±0.48cD

2.2 不同磷处理对柱花草生物量的影响

2.2.1 不同磷处理对柱花草地下生物量的影响

表5为不同基因型柱花草地下生物量在不同磷肥水平处理下的变化，由表5可知，随着磷浓度的增加，柱花草品种地下生物量逐渐增加。在7个不同的磷浓度处理下，各柱花草品种之间差异显著，在P0处理下，S09、S10地下生物量最高，且显著高于其他品种。在P200处理下，S03地下生物量显著高于其他品种，随着磷浓度的增加，各柱花草品种间差异不断发生变化。比较不同基因型柱花草在相同磷处理条件下地下生物量的增幅发现，S09、S10随着磷浓度的增加，其地下生物量增幅较其他品种小，分别为47.06%、48.53%，说明S09、S10在不同的磷浓度下地下生物量变化较小，对于充足磷水平和磷胁迫处理适应能力较强。

2.2.2 不同磷处理对柱花草地上生物量的影响

由表6可知，随着施磷量的提高，不同基因型柱花草品种地上生物量均呈增长趋势。除S07外，其它品种的地上生物量在P0时为最小值，P200时为最大值，且各个磷处理间差异显著。本试验依据Lynch(1998)对磷效率的评价方式，以植株地上生物量为衡量植物磷效率的指标，对柱花草的磷效率进行分类，衡量柱花草磷效率的临界值为9.64 g。即本试验中S01、S07为磷低效型柱花草；S02、S03、S04、S05、S06、S08、S11、S12为磷敏感型柱花草；S09、S10为磷高效型柱花草。

表5 不同磷处理下柱花草地下生物量的变化

Table 5 Variation of underground dry mass of different *Stylosanthes guianensis* under different P levels (g)

品种 Variety	地下生物量 Aboveground biomass						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	0.14±0.01eD	0.38±0.01bcBC	0.4±0.01deB	0.34±0.01eC	0.35±0.02fC	0.38±0.01gBC	0.47±0.02fA
S02	0.10±0.01fC	0.11±0.01gC	0.66±0.02aB	0.66±0.03aB	0.68±0.01aB	0.76±0.04bA	0.72±0.02bAB
S03	0.24±0.02cF	0.32±0.01deE	0.58±0.02bD	0.56±0.02bD	0.68±0.01aC	0.96±0.02aA	0.86±0.01aB
S04	0.14±0.01eE	0.24±0.01fD	0.44±0.02cdB	0.32±0.00eC	0.46±0.02eB	0.28±0.01hCD	0.58±0.02dA
S05	0.28±0.01bD	0.40±0.03bC	0.32±0.02fD	0.42±0.01cdC	0.54±0.02cdB	0.57±0.02eB	0.69±0.01bcA
S06	0.13±0.01eG	0.35±0.01cdF	0.42±0.02dE	0.64±0.01aB	0.46±0.01eD	0.78±0.01bA	0.52±0.01eC
S07	0.14±0.01eF	0.46±0.01aB	0.37±0.01eDE	0.40±0.02dCD	0.36±0.01fE	0.50±0.01fA	0.42±0.01gC
S08	0.19±0.01dE	0.31±0.02eD	0.56±0.02bC	0.30±0.01eD	0.60±0.00bB	0.34±0.02gD	0.68±0.01bcA
S09	0.36±0.01aE	0.46±0.01aD	0.48±0.01cCD	0.45±0.01cD	0.50±0.01deC	0.54±0.02efB	0.68±0.01bcA
S10	0.35±0.01aD	0.44±0.01aC	0.42±0.01dC	0.52±0.01bB	0.51±0.01dB	0.70±0.01cA	0.68±0.02bcA
S11	0.14±0.01eD	0.32±0.01deC	0.56±0.01bB	0.56±0.02bB	0.58±0.01bcB	0.64±0.02dA	0.66±0.02cA
S12	0.08±0.01fE	0.23±0.01fD	0.44±0.01cdBC	0.40±0.01dC	0.46±0.02eB	0.68±0.01cdA	0.72±0.03bA

表6 不同磷处理下柱花草地上生物量的变化

Table 6 Variation on shoot dry mass of different *Stylosanthes* under different P levels (g・plant^{-1})

品种 Variety	地上生物量 Overground biomass						
	P0	P20	P35	P50	P75	P100	P200
S01	4.35±0.03cdG	4.77±0.09dF	5.88±0.11ghE	6.54±0.06hD	7.18±0.09fC	7.48±0.05gB	8.84±0.07iA
S02	3.96±0.08cdF	5.05±0.07cdE	7.18±0.10efD	9.78±0.04dC	9.98±0.32cC	11.42±0.03cB	13.28±0.20cdA
S03	4.43±0.03cF	5.54±0.15cE	7.88±0.04cdD	8.98±0.19eC	10.81±0.41bB	7.72±0.07gD	14.46±0.23aA
S04	3.23±0.03eF	4.04±0.06eE	4.52±0.06iDE	4.74±0.36iD	8.86±0.18eB	5.72±0.03hC	10.28±0.42gA
S05	5.44±0.03bF	6.80±0.07bE	8.36±0.13cC	7.86±0.06fgD	10.65±0.20bB	8.28±0.06fC	14.00±0.14abA
S06	3.72±0.02deG	4.70±0.06dF	6.96±0.05fE	9.74±0.07dD	11.13±0.25bC	12.50±0.22bB	14.60±0.29aA
S07	5.57±0.06bF	6.94±0.02bD	6.34±0.08gE	8.22±0.07fC	9.66±0.08cdA	9.16±0.10dB	9.58±0.09hA
S08	4.43±0.02cF	5.54±0.22cE	5.64±0.09hE	8.04±0.04fD	9.06±0.11deB	8.62±0.02eC	12.82±0.08deA
S09	9.60±0.07aD	9.80±0.54aD	11.01±0.56aC	11.91±0.03aBC	12.36±0.18aAB	12.93±0.04aAB	13.58±0.21bcA
S10	9.88±0.23aD	9.96±0.06aD	10.06±0.25bCD	10.24±0.13cCD	10.64±0.22bC	11.36±0.06cB	12.30±0.30eA
S11	5.68±0.09bF	7.10±0.21bE	7.46±0.04deE	10.76±0.28bC	9.96±0.19cD	12.38±0.11bB	13.02±0.11cdA
S12	3.23±0.10eF	4.04±0.08eE	7.67±0.05deD	7.48±0.06gD	8.86±0.14eB	8.44±0.07efC	11.50±0.15fA

3 讨论与结论

形态指标是植株及其各部分在形态上可测出的各种指标，包括株高、茎粗、根长等指标，这些指标比较直观，是植物生长的重要指标，也是正确估计植株生长特征和评价植株生长速度所不可或缺的依据。本研究结果中，随着土壤磷浓度的增加，各柱花草总分枝数与对照相比都有增加，说明磷对柱花草分枝具有促进作用。这与邵辰光等（2013）的研究结果一致。不同基因型柱花草对土壤磷浓度的具体要求不同，本试验中仅对磷肥对柱花草的形态指标的影响进行了研究，更深入的响应机制还需更进一步的研究。土壤磷浓度对柱花草的株高影响较大，而对柱花草的茎粗影响较小，这可能是柱花草对磷的响应机制之一。本试验结果中，最佳磷肥浓度和对照之间相比，茎粗最大增长率为62.5%，株高最大增长率为48.65%。由于茎粗的基数较小，而株高的基数较大，尽管茎粗的增长率更大但株高的增长间差异更为显著。由此可见磷对柱花草生长和发育具有重要的促进作用，而茎粗的变化较小可能是因为供试柱花草生长的时间较短以及柱花草养分分配的特性所导致。研究发现，施用磷肥可增加小麦的株高、次生根数、分蘖数以及有效穗数，增加小麦的千粒重，提高产量（刘桂荣等，2018），说明磷对植物生长和高产具有重要作用。磷浓度的增加抑制了柱花草主根的伸长，而对侧根和根系数量有显著的促进作用，这可能是柱花草对磷的响应机制之一。根系接触土壤，对磷浓度的变化反应敏感，随着土壤磷浓度的增加，柱花草主根长度显著减少，这与郭轶敏（2014）、余爱（2011）等研究结果相一致。说明不同的土壤磷浓度对柱花草的根系变化产生重大影响，较低的磷浓度对根系生长有正影响，对株高、茎粗、分枝则产生负影响，高磷则抑制根的生长，促进植株地上部分生长。随着磷浓度的升高，柱花草单株地上生物量增大，地下生物量为减小。磷可以增加柱花草的鲜草及干草产量，这与孙小富等（2019）的研究结果相一致。不同基因型柱花草对磷浓度的要求具有差异性，以相同供磷水平为条件，比较其形态特征的差异性，评价其对供磷水平的要求、对低磷胁迫的适应性。本试验研究发现，有钩和GC1480柱花草相较于其他品种株高较高，且在不同的磷浓度处理下其变化幅度小；磷浓度变化对柱花草茎粗的影响较小；GC1480、西卡、库克和有钩柱花草四个品种在磷胁迫下其形态指标变化不大，而其他品种对磷浓度变化较为敏感。张德等（2018）研究发现，磷添加对干热河谷柱花草种植具有明显的促生效果，不同的柱花草品种对低磷的耐受程度不同。不用基因型柱花草在相同磷浓度条件下的生物量差异显著，筛选应用柱花草的试验还需进一步深入细化的研究。本试验中，12个柱花草品种的生态学指标对磷浓度变化的响应趋势基本一致，但其对磷浓度的适应性存在显著的差异，这主要是由其基因型的不同导致的。研究发现，在低磷或在正常供磷条件下，苗期全株地上部干重、地下部干重、株高、根长的变异系数均较大，在耐低磷特性上品种间存在较大差异，有利于筛选耐低磷基因型（龚丝雨等，2019）。磷高效性的植物品种对低磷环境的耐受性更好，有研究表明，磷高效燕麦品种对低磷环境的适应性更强（贺鑫等，2019）。

研究结果表明，土壤磷浓度增加会促进柱花草总分枝数、株高、茎粗、单株地上及地下生物量的增加，会抑制柱花草根系的生长和发育。从柱花草对磷浓度的适应性进行了磷效率的划分，发现其存在显著的基因型差异。结果表明，西卡柱花草、库克柱花草为磷低效型柱花草；随着磷浓度的增加增幅较小，且在低磷和高磷的条件下产量均较低。有钩柱花草、GC1463柱花草为磷高效型柱花草，随着磷浓度的增加增幅较小，且在低磷和高磷的条件下产量均较高。其余供试品种为磷敏感型柱花草，随着磷浓度的增加增幅较大，且在低磷条件下产量较低，高磷的条件下产量则较高。磷高效型柱花草在各个磷浓度的土壤中的适应性及产量比其他基因型的柱花草高。柱花草在酸性低磷土壤中的适应性强，筛选和培育磷高效型柱花草具有重要的理论和现实意义。

参考文献：

BAI CJ, LIU GD, WANG DJ, et al., 2004. Evaluation of synthetic characteristics of *Stylosnathes guiansnsis* with high yield and anthracnose resistance[J]. Chine J Trop Crops, 25(2): 87-94.[白昌军，刘国道，王东劲，等，2004. 高产抗病圭亚那柱花草综合性状评价[J]. 热带作物学报，25（2）：87-94.]

CHAKRABORTY S, GHOSH R, GHOSH M, et al., 2004. Weather‑based prediction of anthracnose severity using artificial neural network models[J]. Plant Pathology, 53(4): 375-384.

CAI XY, LAI ZQ, YI XF, et al., 2010. The utilization of *Stylosanthes* in southern China and its development countermeasures[J]. Shanghai J Anil Hus and Vet Med, (3): 51-53.[蔡小艳，赖志强，易显凤，等，2010. 我国南方柱花草的利用现状及发展对策[J]. 上海畜牧兽医通讯，（3）：51-53.]

DU YM, BAI CJ, TIAN J, et al., 2008. Genotypic Variations of *Stylosanthes* in adaptation to low-P acid soils and the possible physiological mechanisms[J]. J S Chin Agric Univ, (4): 6-11.[杜育梅，白昌军，田江，等，2008. 柱花草适应酸性缺磷土壤的基因型差异及可能的生理机制[J]. 华南农业大学学报，（4）：6-11.]

GUO YM, WEN YF, SHI LT, et al., 2014. Influence of soil phosphorus levels on plant height, root length and biomass of *Stylosanthes*[J]. Pratac & Anim Hus, (1): 1-4+21.[郭轶敏，文亦芾，史亮涛，等，2014. 土壤磷水平对柱花草株高、根长及生物量的影响[J]. 草业与畜牧，（1）：1-4+21.]

GONG SY, LIANG XH, ZHONG SR, et al., 2019. Screening of tobacco genotypes tolerant to low-phosphorus and their phosphorus efficiency at tobacco seedling stage[J]. J Plant Nutr Fert Sci, 25(4): 661-670[龚丝雨，梁喜欢，钟思荣，等，2019. 苗期耐低磷烟草基因型筛选及其磷效率[J]. 植物营养与肥料学报，25（4）：661-670.]

HOU XL, TIGABU M, ZHANG Y, et al., 2017. Root plasticity, whole plant biomass, and nutrient accumulation of Neyraudia reynaudiana in response to heterogeneous phosphorus supply[J]. J Soi Sed, 17 (1): 172-180.

HE HX, BAI CJ, JIANG CS, et al., 2000. Comparison experiment on 23 selected strains of *Stylosanthes guianensis*[J]. Gra Turf, 91(4): 20-25.[何华玄，白昌军，蒋昌顺，等，2000. 23 个柱花草品系比较试验[J]. 草原与草坪，91（4）：20-25.]

HE X, QI BJ, WANG M, et al., 2019. Differences in biomass and phosphorus nutrition of *Oats* with different phosphorus efficiency under low phosphorus stress[J/OL]. Mol Plant Breed: 1-7[2019-09-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20190111.0903.014.html. [贺鑫，齐冰洁，王敏，等，2019. 低磷胁迫下燕麦不同磷效率品种生物量及磷素营养的差异[J/OL]. 分子植物育种：1-7[2019-09-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20190111.0903.014.html.]

JIANG CS, 1995. Study and utilization of different species of *Stylosanthes* in China [J]. Res Trop Crops, (3): 64-70.[蒋昌顺，1995. 我国对柱花草属不同种的研究与利用[J]. 热带作物研究，(3)：64-70.]

JIANG CS, ZHANG XS, 2006. Analysis on nuclear rDNA ITS1 sequence of *Stylosanthes guianensis*[J]. Chin High Technol Let, 16(1): 73-77.[蒋昌顺，张新申，2006. 柱花草核 rDNA 的 ITS1 序列分析[J]. 高技术通讯，16（1）：73-77.]

LI JY, LIU XD, ZHOU W, et al., 1995. Study on new crop breeding techniques for effective utilization of soil nutrients[J]. Sci Chin (SER, B), (1): 41-48. [李继云，刘秀娣，周伟，等，1995. 有效利用土壤营养元素的作物育种新技术研究[J]. 中国科学(B 辑 化学、生命科学、地学)，(1)：41-48.]

LAI ZQ, CAI XY, YI XF, et al., 2010. Guangxi Forage Flora Volume I [D]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 12.[赖志强，蔡小艳，易显凤，等，2010. 广西饲用植物志第 I 卷[D]. 南宁：广西科学技术出版社，12.]

LI XF, ZHAO QJ, WANG J, 2017. Effects of the mixed sowing ratio and watering frequency on the inter-specific competition between *Stylosanthes guianensis* 'Reyan No.2' and *Mimosa* invisa during early growth[J]. Acta Agr Sin, 25(5): 1088-1096.[李雪枫，赵庆杰，王坚，2017. 混播比例和浇水频率对热研 2 号柱花草和巴西含羞草生长早期种间竞争的影响[J]. 草地学报，25（5）：1088-1096.]

LYNCH J, 1998. The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture [J]. J Crop Product, 1(2): 241-264.

LIU GR, XIAO H, CHEN YP, 2018. Effect of phosphate fertilizer on growth and yield of wheat[J]. App Eng Technol, 38(29): 14+17.[刘桂荣，肖 慧，陈月平，2018. 磷肥对小麦生长发育及其产量的影响 [J]. 农业工程技术，38（29）：14+17.]

SCHACHTMAN DP, AYLING SM, 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell[J]. Plant Physiol, 116(2): 447-453.

SHAN GY, YI KX, ZHAO H, 2009. Recent advances in studies of Stylosanthes tissue culture[J] .Chin J Trop Agric, 29(12): 41-45.[单国燕，易克贤，赵辉，2009. 柱花草组织培养技术研究进展[J]. 热带农业科学，29（12）：41-45.]

SHAO CG, WANG H, BI YF, 2013. Influence of different phosphorus levels on lateral bud germination of *Stylosanthes*[J]. J Yunnan Agric Univ, 28(1): 113-117.[邵辰光，王荟，毕玉芬，等，2013. 不同施磷量对柱花草侧芽发生的影响[J]. 云南农业大学学报，28（1）：113-117.]

SUN XF, HAO J, ZHAO LL, et al., 2019. Effect of different fertilization on the batch yield and

morphological structure of *Medicago* sativa in a Karst area of Guizhou, China[J]. Pratac Sci, 36(1):123-131.[孙小富，郝俊，赵丽丽，等，2019. 喀斯特地区不同施肥配比对紫花苜蓿单茬产量及形态构建的影响[J]. 草业科学，36（1）：123-131.]
TU XC, LIU DG, BAI CJ, et al., 2008. Introduction comparison among 13 cultivars of *Stylosanthes guianensis*[J]. J Anhui Agric Sci, 36(33): 14478-14488.[涂旭川，刘国道，白昌军，等，2008. 13种柱花草的引种比较[J]. 安徽农业科学，36（33）：14478-14488.]
YU A, YANG F, ZHANG Y, et al., 2011. Influences of different phosphorus concentrations on the root distribution of *Stylosanthes* and black seed *Paspalum*[J]. Acta Pratac Sin, 20(3): 219-224.[余爱，杨帆，张宇，等，2011. 不同施磷浓度对柱花草和黑籽雀稗根系分布的影响[J]. 草业学报，20（3）：219-224.]
ZHANG FL, DONG XY, SHEN RF, 2009. Screening of *Stylosanthes guianensis* genotypes tolerant to low phosphorus stress on acid soil of south China[J]. Jiangsu J Agric Sci, 25(3):556-559.[张富林，董晓英，沈仁芳，2009. 南方红壤地区耐低磷柱花草基因型筛选[J]. 江苏农业学报，25（3）：556-559.]
ZHOU BY, GUO ZF, 2005. Effects of ABA and its synthetic inhibitors on cold tolerance and antioxidant enzyme activities of *Stylosanthes*[J]. Acta Pratac Sin, 14(6): 94-99.[周碧燕，郭振飞，2005. ABA 及其合成抑制剂对柱花草抗冷性及抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报，14（6）：94-99.]
ZHANG D, HE GX, LONG HY, et al., 2018. Effects of phosphorus addition on the relationship between the aboveground and underground biomass of *Stylosanthes* in dry-hot valley[J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci Ed), 33(2): 294-300.[张德，何光熊，龙会英，等，2018. 磷添加对干热河谷柱花草地上—地下生物量间关系的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版)，33（2）：294-300.]